Korean Journal Of Agricultural Science

pISSN : 2466-2402
eISSN : 2466-2410

ENGINEERING

Estimation of irrigation supply from agricultural reservoirs based on reservoir storage data

Hansol Kang[1], Hyunuk An[1,*], Kwangya Lee[2,*]

[1]Department of Agricultural and Rural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

[2]Agricutural Drought Mitigation Center, Korea Rural Corporation (KRC), Daejeon 35260, Korea.

[*]Corresponding authors: Kylee@ekr.or.kr, hyunuk@cnu.ac.kr

Abstract

Recently, the quantitative management of agricultural water supply, which is the main source for water consumption in Korea, has become more important due to the effective water management organization of the Korean government. In this study, the estimation method for irrigation supply based on agricultural reservoir storage data was improved compared to previous research, in which drought year selection was unclear, and the outlier data for the rainfall-irrigation supply were not eliminated in the regression analysis. In this study, the drought year was selected by the ratio of annual precipitation to mean annual precipitation and the storage rate observed before the start of irrigation. The outlier data for the rainfall-irrigation supply were eliminated by the Grubbs & Beck test. The proposed method was applied to nine agricultural reservoirs for validation. As a result, the ratio of annual precipitation to mean annual precipitation is less than 53% and the storage rate observed before the start of irrigation is less than 55% it was judged to be the drought year. In addition, the drought supply factor, *K*, was found to be 0.70 on average, showing closer results to the observed reservoir rates. This shows that water management at the real is appling drought year practice. It was shown that the performance of the proposed method was satisfactory with NSE (Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient) and R^2 (coefficient of determiniation) except for a few cases.

Keywords: agricultural reservoir, drought year, irrigation supply, outlier

Check for updates

OPEN ACCESS

Citation: Kang H, An H, Lee K. 2019. Estimation of irrigation supply from agricultural reservoirs based on reservoir storage data. Korean Journal of Agricultural Science 46:999-1006. https://doi.org/10.7744/kjoas.20190082

Received: November 06, 2019

Revised: November 12, 2019

Accepted: November 20, 2019

Copyright: © 2019 Korean Journal of Agricultural Science

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Introduction

최근 물 관리 일원화로 과학적 · 정량적 물관리가 중요한 현안으로 떠오르고 있으며, 그 중 국내 용수사용량에서 가장 큰 비중을 가지고 있는 농업용수의 정량적인 파악이 과거에 비해 더욱 중요해지고 있는 실정이다. 농업용 저수지에서 공급되는 용수는 농업용수의 50% 이상을 차지하고 있어 공급량의 합리적인 산정이 필수적이라 할 수 있으나, 우리나라에는 약 17,200여개의 농업용 저수지가 존재하여 이를 모두 계측하는 것은 현실적으로 불가능하다.

위와 같은 이유로 종래에 대부분의 농업용 저수지의 용수공급량은 논의 증발산량과 침투량을 고려하여 산정된 필요수량에 시설관리 용수량을 고려하여 산정하고 있다(MAF, 1997). 하지만 실제 현장에서의 공급량과 모의된 공급량 사이에는 여러가지 변수로 인해 많은 차이가 발생하며, 현장의 작부시기와 필요수량 모의 작부시기가 달라 4, 5월에 공급량차이가 각각 5.4, 12.9배 차이가 나는 경우도 보고되었다(Lee et al., 2006). 또한 모의된 무효방류량과 계측값의 차이로 실제 공급량이 모의된 공급량에 비해 약 2.4배 높게 산정된 예도 보고된 바 있으며(Shim et al., 2012), 수로손실의 경우 평균적인 15%를 사용하지만 수로관리손실이 30 – 75%, 수로손실이 2 – 45% 등 지역마다 차이가 나는 결과도 보고되었다(Ju et al., 2005; Kim et al., 2006). 이와 같이 기상학적, 지형학적 특성에 따라 저수지별로 각기 다른 관행적 경험에 의존하여 저수지 관리가 되고 있기 때문에 실제와 모의 공급량 사이에는 차이가 발생하는 것이 일반적이다(Nam et al., 2012).

이러한 필요수량 기반의 관개공급량의 추정방법과 실제 공급량과의 괴리를 극복하기 위하여, Kang et al. (2019)는 계측 저수율과 강우-공급량 회귀식을 기반으로 하여 저수지관리관행을 반영한 저수율을 추적함과 동시에 관개공급량을 추정하는 방법을 제시하였다. 하지만 Kang et al. (2019)에서는 대상저수지가 3개소로 비교적 검증이 충분하지 않은 점, 가뭄년에 대한 고려가 자의적인 점, 회귀식 구축 시 이상치(outlier)를 제거하지 않은 점 등의 한계점이 있다. 이에 본 연구에서는 위에서 제시된 Kang et al. (2019)의 한계를 극복하고자 전국 8개소의 대상저수지를 선정하였으며, 가뭄년의 선정과 가뭄년 계수를 최적화 기법을 도입하여 산정하도록 하였다. 또한 회귀식 구축 시 이상치를 제거하고 이에 따른 결과를 분석하였다.

Materials and Methods

대상 저수지 및 자료

저수율 기반 공급량 추정 모형을 검증하기 위해 주 수원 공이며 100만 톤 이상의 저수량을 가진 농업용 저수지를 전국에서 무작위로 선정하여 9개 대상 저수지를 선정하였으며, 이는 강원도 철원군에 위치한 동송 저수지, 인천광역시 강화군에 위치한 길상 저수지, 충청북도 음성군에 위치한 양덕 저수지, 충청남도 청양군에 위치한 적누 저수지, 전라북도 익산시, 완주군에 위치한 미륵 저수지, 광곡 저수지, 전라남도 고흥군에 위치한 원등 저수지, 경상북도 경주시에 위치한 심곡 저수지, 경상남도 김해시에 위치한 진례 저수지이다. 대상 저수지들의 제원, 수혜면적 등을 Table 1에 정리하였다. 모형에 필요한 각 저수지의 저수율 자료는 농어촌공사에서 제공하는 농촌용수 종합정보시스템(rural agricultural water resource information system, RAWRIS)으로부터 제공받았다. 모형의 학습 및 검정 기간은 15년(2001 – 2015년)으로 설정하였다.

Table 1. Reservoir characteristics and meteorological administration location.

Reservoir	Watershed area (ha)	Irrigation area (ha)	Total storage (103 m^3)	Staion
Gwangok	392.0	185.0	1,339.0	Junjoo
Gilsang	178.5	226.4	1,326.0	Incheon
Yangduck	754.0	292.1	1,119.1	Chungju
Jucknoo	452.0	164.3	2,610.8	Buyeo
Mireuk	626.0	296.7	1,270.0	Gunsan
Wondeung	375.0	185.7	1,417.0	Goheung
Simgok	1,970.0	1,025.0	3,124.0	Pohang
Jillye	472.0	241.8	2,095.0	Geochang
Dongsong	1,827.0	802.3	3,770.0	Chuncheon

저수지 공급량 추정 기법

계측된 저수율을 기반으로 공급량을 추정하는 방법은 기본적으로 Kang et al. (2019)이 제시한 방법을 따른다. 저수지 물수지식을 공급량에 대해서 변형하면 다음식과 같다.

$$O = I + PR - \Delta S - E - OF \quad (1)$$

여기서, △S는 저수량 차, I는 유입량, PR은 수면 강수량, OF는 물넘이 월류량, E는 수면 증발량, O는 관개공급량을 나타낸다. $\triangle S$는 계측자료를 활용하였고, 월류량 OF는 만수위 이상의 유입량을 물넘이 월류량으로 결정하였으며, 직접 저수지 유입량 PR과 저수지 표면 증발량 E은 기상관측으로부터 얻은 값을 사용하였다. 유입량 I는 미계측유역에 적용이 가능한 일 단위 유출모형인 수정 3단 Tank Model을 사용하여 산정하였다.

(1)식은 유출모형과 저수율변화의 불확실성을 줄이기 위하여 순단위로 적용되었으며, 이를 통하여 공급량을 산정하였다. 하지만 이렇게 산정한 공급량은 과거 자료를 분석하는 데에는 유용하지만 예측에는 사용하기 어려우므로 본 연구에서는 강수량과 과거 공급량을 이용하여 다음과 같은 순단위의 선형회귀방정식을 구축하여 공급량 모형을 구성하였다.

$$O = \alpha \times RAIN + \beta \quad (2)$$

여기서 O는 저수율 기반 순 단위 공급량, α는 회귀식 기울기, β는 회귀식 절편, $RAIN$은 순별의 강수량 합산을 나타낸다.

위 선형회귀식은 작부시기에 따라 순 단위단위로 일정한 관행으로 용수관리가 되고 있다는 가정하에 구축되었으나, 일반적으로 가뭄 시기에는 평년과 비교하여 공급량이 적어지는 경향이 있다. 이러한 가뭄 년도의 공급 관행을 반영하기 위해 가뭄 년도에는 가뭄공급계수 K를 도입하여 공급량을 다음과 같이 산정하기로 한다.

$$O' = O \times K \quad (3)$$

여기서 O'은 가뭄 년도의 공급량, O는 평년의 공급량, K는 가뭄공급계수이다.

최적화를 이용한 가뭄 년도 및 가뭄공급계수 결정

기존 Kang et al. (2019) 에서는 가뭄 년도의 선정과 가뭄공급계수 K의 값은 명확한 기준 없이 문헌과 Trial-error 방법을 통하여 산정하였으며, 이는 적용에 한계가 존재하였다. 본 연구에서는 최적화 기법을 이용하여 모의한 저수율과 실측 저수율 간의 NSE (Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient)와 R^2 (coefficient of determiniation)의 합을 최대화하도록 가뭄 년도와 가뭄공급계수를 결정하였다. 가뭄 년도의 선정 기준은 관개 시작 전 저수율과 전체 평균 강수량 대비 연강수량 비율을 기준으로 선정하였으며, 이 두 기준은 가뭄공급계수와 함께 최적화 변수로 설정하였다. 최적화 기법은 개미군집 알고리즘 ACO (ant colony optimization)을 사용하였다. 개미군집 알고리즘은 개미의 집단행동에서 아이디어를 가져온 최적화 알고리즘으로, 최적의 경로를 찾는 문제에 주로 사용되나 일반적인 글로벌 최적화 알고리즘으로 타 문제에도 범용적으로 활용할 수 있다. 보다 상세한 알고리즘의 설명은 Blum (2005)을 참고하기 바란다. 본 연구에서 저수지 추적의 계산량은 일반적으로 크지 않기 때문에 글로벌 최적화 탐색기법인 경우 최적화 방법의 효율성 및 종류는 연구방향에 크게 영향이 없다. 모형의 적합성과 최적화의 목적함수로 쓰인 통계적 지표 NSE와 R^2의 각각의 식은 다음과 같다.

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2}\right] \quad (4)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i + P_i - \bar{O})^2} \quad (5)$$

여기서 O는 실측치, P는 모의치, Ō는 실측치의 평균을 나타낸다. NSE는 $-\infty$ – 1.0 범위 값을 나타내며 1.0에 가까울수록 모의치가 실측치의 경향을 잘 반영하는 것을 의미하고 R^2는 0 – 1.0 범위 값을 나타내며 1.0에 가까울수록 회귀 모델이 데이터를 잘 설명한다고 볼 수 있다.

강우-공급량 회귀식 이상치 제거

자료의 수집오류, 기록오류 또는 자연적인 오류로 인해 자료집단으로부터 심하게 편차를 보이는 자료를 이상치라 한다. 강수량에 따른 표준 공급량을 제시하기 위한 기법으로 특수 상황에서의 관행적 방법은 이상치로 판단하고 제외하도록 하였다. 이상치 제거는 정규분포로 가정하고 최고치 또는 최저치가 유의수준 10% 이내 있는지 여부를 검정하는 다음과 같은 G-B (Grubbs & Beck) 검정을 사용하였다(Grubbs and Beck, 1972).

$$K_n = -3.62201 + 6.28446 \cdot n^{\frac{1}{4}} - 2.49835 \cdot n^{\frac{1}{2}} + 0.491436 \cdot n^{\frac{3}{4}} - 0.037911 \cdot n \quad (6)$$

$$x_{H,L} = \exp\left(\bar{x} \pm K_n \sigma_n\right) \quad (7)$$

여기서 K_n은 표본자료의 수와 유의수준에 따른 G-B값(유의수준 10%), $\bar{x}$는 표본자료의 평균, σ_n는 표본자료의 편차이다. 위를 통해 구한 x_H보다 크면 고이상치로 간주하고, x_L보다 작으면 저이상치로 간주하여 분석에서 제외시킨다. 본 연구에서 식 (2)의 강우량과 공급량을 표본자료로 고려하여 G-B검정에 따라 이상치로 판별되면 회귀식 계산 시 제외하고 계산하도록 하였다.

Results and Discussion

이상치를 제거하지 않고 가뭄 년도를 반영하지 않은 결과를 Est. 1, 이상치를 제거하지 않고 가뭄 년도를 반영한 결과를 Est. 2, 이상치를 제거하고 가뭄 년도를 반영한 결과를 Est. 3으로 하여 본 연구에서의 방법론을 검증하였다. 최적화 기법을 활용한 가뭄 년도의 선정 기준인 관개 시작 전 저수율과 전체 평균 강수량 대비 연강수량 비율, 가뭄공급계수, 가뭄 년도는 다음과 같이 정리하였다(Table 2).

Table 2. Reservoir drought determination factors and the drought year with ACO.

Reservoir	Drought coefficient	Rainfall ratio (%)	Standard rate (%)	Drought years
Gwangok	0.69	40	65	2007, 2009
Gilsang	0.64	55	30	2015
Yangduck	0.76	70	70	2001, 2015
Jucknoo	0.79	70	70	2001, 2002, 2008, 2015
Mireuk	0.80	40	70	2001, 2002
Wondeung	0.67	40	40	2009
Simgok	0.77	40	30	2009
Jillye	0.50	50	45	2008, 2009, 2014
Dongsong	0.74	70	70	2014, 2015

양덕 저수지, 적누 저수지, 동송 저수지에서는 연 강수량이 평균 강수량에 비해 70% 이하, 관개기 시작시의 저수율 5/1일의 저수율이 70% 이하 인 상황을 만족할 때 가뭄 년도로 판단하였다. 평균적으로 평균 강수량 대비 연강수량 53% 미만, 5/1일 관개기 시작 시 저수율 55% 미만 일 경우 가뭄 년도로 판단하는 것을 보여준다. 또한 평년대비 가뭄 년도의 공급량을 나타내는 가뭄공급계수 K는 평균적으로 0.70으로 나타났다.

다음은 방법론을 검증하기 위해 실제 저수율과 모의된 저수율을 저수지별로 비교한 결과는 다음 그림 Fig. 1 - 3과 같으며, 통계적 지표 NSE와 R^2를 비교한 결과는 다음 표에 정리하였다(Table 3).

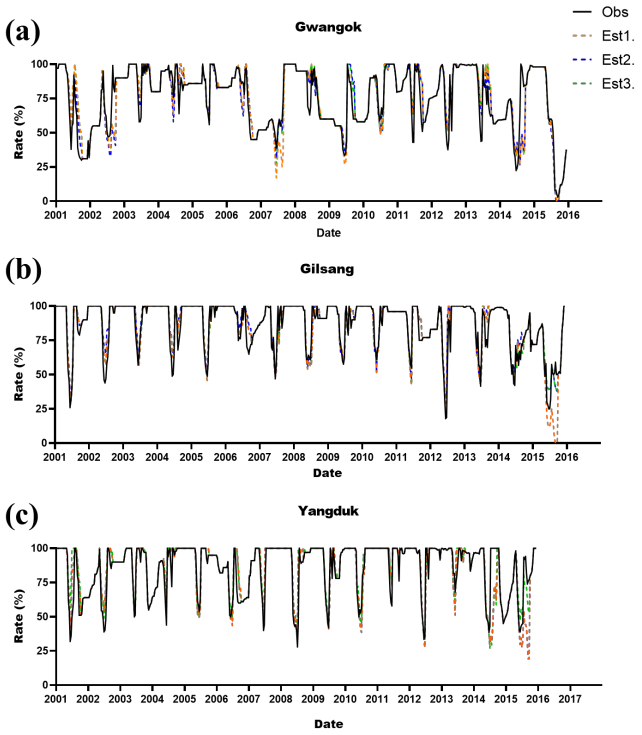

Fig. 1. Comparison of the measured storage rates and the simulated storage rates based on the three estimation methods for (a) Gwangok, (b) Gilsang, and (c) Yangduk reservoirs.

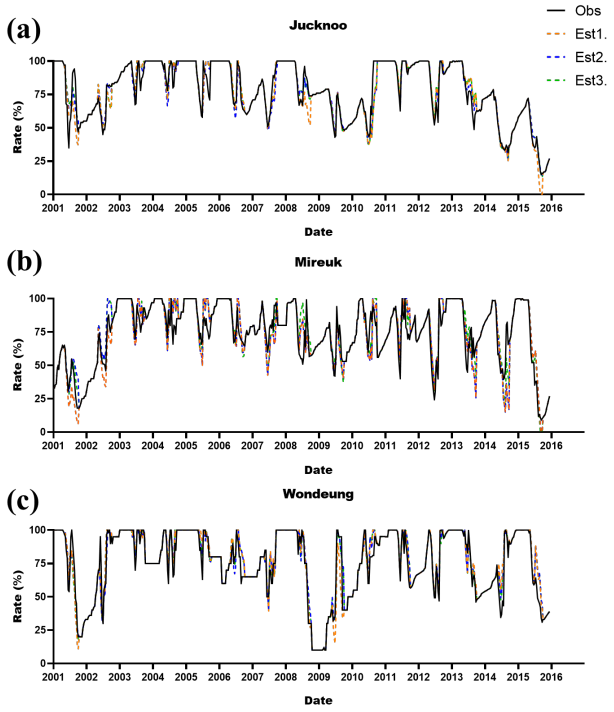

Fig. 2. Comparison of the measured storage rates and the simulated storage rates based on the three estimation methods for (a) Jucknoo, (b) Mireuk, and (c) Wondeung reservoirs.

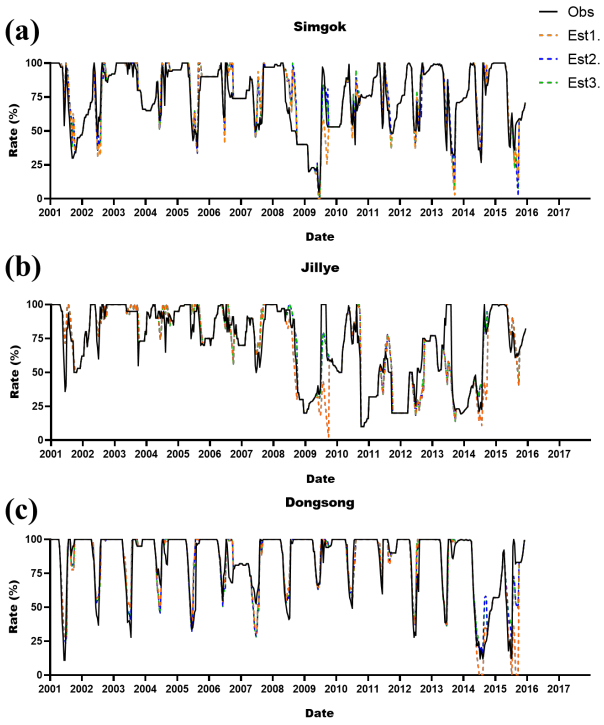

Fig. 3. Comparison of the measured storage rates and the simulated storage rates based on the three estimation methods for (a) Simgok, (b) Jillye, and (c) Dongsong reservoirs.

Table 3. Result of NSE and R^2 by Reservoirs (2001 – 2015).

Reservoir	Est 1.		Est 2.		Est 3.	
	NSE	R^2	NSE	R^2	NSE	R^2
Gwangok	0.54	0.64	0.63	0.67	0.66	0.69
Gilsang	0.72	0.79	0.84	0.85	0.84	0.85
Yangduck	0.51	0.60	0.57	0.61	0.56	0.61
Jucknoo	0.73	0.77	0.82	0.82	0.82	0.83
Mireuk	0.53	0.66	0.54	0.62	0.60	0.69
Wondeung	0.72	0.73	0.79	0.80	0.79	0.81
Simgok	0.67	0.74	0.69	0.75	0.70	0.77
Jillye	0.18	0.49	0.54	0.62	0.55	0.63
Dongsong	0.65	0.70	0.74	0.76	0.71	0.73

NSE, Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient; R^2, coefficient of determiniation.

NSE 값에 대한 평가 분류 기준은 Moriasi et al. (2007)에서 제시한 월단위 모의에 대한 기준을 사용하였다. $0.75 < NSE \leq 1.00$ 은 "Very good",. $0.65 < NSE \leq 0.75$ 는 "Good", $0.50 < NSE \leq 0.65$ 는 "Satisfactory", $NSE \leq 0.50$ 는 "Unsatisfactory" 로 분류하였다. 이상치 제거와 가뭄 년도를 반영하지 않은 Est 1. 의 결과는 "Unsatisfactory" 는 1개로 진례 저수지로 나타났으며, "Satisfactory" 에는 광곡 저수지, 양덕 저수지, 미륵 저수지, 동송 저수지로 4군데로 나타났으며, "Good" 에는 길상 저수지, 적누 저수지, 원등 저수지, 심곡 저수지로 총 4군데로 나타났다. 결정계수 R^2의 값은 "Unsatisfactory"의 진례 저수지가 0.49 인 것을 제외하고는 전체 평균 0.70으로 양호한 값으로 나타났다.

다음으로 최적화 기법을 통한 가뭄 년도 및 가뭄공급계수를 적용한 Est 2.의 결과를 Est 1.과 비교하면 NSE와 R^2 값이 증가한 것을 보여주고 있다. Est 1.에서 "Unsatisfactory"로 분류된 진례 저수지의 경우 NSE가 0.54로 "Satisfactory"로 양호해진 결과를 보여주었고 "Very good"은 0개에서 길상 저수지, 적누 저수지, 원등 저수지로 3개가 되었으며, "Good" 은 5개에서 동송 저수지, 심곡 저수지 2개로 나타났고 "Satisfactory" 는 3개에서 광곡 저수지, 양덕 저수지, 미륵 저수지, 진례 저수지 4개로 나타났다. 또한 결정계수 R^2의 경우 미륵 저수지를 제외하고 전체 평균적으로 상승한 결과를 보여주고 있다. 이는 가뭄 년도를 고려한 공급량 추정이 실제 저수율을 모의하는데 있어 적합하다고 보여진다.

가뭄 년도와 이상치 제거 둘 다 고려한 Est 3.은 Est 2. 결과와 비교하여 NSE와 R^2가 동송 저수지를 제외한 저수지에서 증가하거나 비슷한 결과를 보였다. 이는 이상치를 제거하는 것이 보다 더 정확한 관개용수 공급량 산정에 도움이 되는 것으로 분석된다. 하지만, 동송 저수지의 경우 이상치를 제거하였을 경우 오히려 정확도가 감소하는 경향을 보였다. 이는 강우량과의 선형관계식으로는 관개관행을 모두 반영하지 못하기 때문인 것으로 분석되며, 본 연구에서 제시한 방법론의 한계로 판단된다.

Conclusion

본 연구에서는 현장에서의 농업용 저수지의 물관리가 관행적으로 관리되고 있는 점을 반영하기 위해 계측되고 있는 저수율 자료와 기상자료를 활용한 공급량 추정 기법을 제시하였다. 기존 연구의 한계점을 개선하기 위해, 모의공급량과 실제 공급량의 NSE와 R^2를 목적함수로 최적화 기법을 활용하여 가뭄 년도와 가뭄공급계수를 산정하였다. 또한 강우량-관개공급량 선형 회귀식 구축 시 이상치를 제거하였다. 전국에서 9개 저수지를 선정하여 공급량을 추정하였으며, 추정한 공급량을 이용하여 저수율을 추적하고 이를 실측 저수율을 비교하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

전국 9개 저수지에 대하여 개선된 방법론을 검증한 결과 진례 저수지를 제외하고 8개 저수지에 대해 NSE기준 "Satisfactory" 이상으로 분석되었으며, 7개의 저수지에서 R^2 가 0.65 이상으로 분석되었다.

가뭄 년도에는 선형적으로 평년에 비해 관개용수공급이 줄어드는 것으로 모형화 하였으며, 가뭄 년도 및 선형계수는 최적화 기법을 통하여 추정하였다. 그 결과 평균적으로 관개기 시작전 저수율은 55% 미만, 연강수량 비율은 53% 미만을 가뭄 년도로 판단하는 것으로 분석되었으며, 가뭄공급계수는 평균 0.7로 분석되었다. 가뭄 년도 적용전과 후의 결과를 비교하면 공급량의 정확도가 눈에 띄게 향상된 것을 확인할 수 있었으며, 이는 가뭄 년도에는 용수공급이 줄어든다는 것을 반증하고 있다.

회귀식 구축 시 강우-공급량 관계에서 이상치를 제외하면 정도가 크지는 않으나, 전반적으로 정확도가 향상되는 결과를 나타내었다.

본 연구의 장점은 관개공급량을 기존 산정방법과 같이 필요수량에만 의존하지 않고 농업용 저수지 저수율 데이터를 활용하여 산정한다는 점이다. 하지만, 검증의 방법론에서 한계가 있으며 향후 실측공급량과의 비교를 통하여 추가적인 검증이 필요할 것이다. 그럼에도 불구하고, 본 연구에서 제시한 방법론은 저수율과 기상자료만 있으면 손쉽게 적용이 가능하여 향후 매우 다수의 저수지로의 적용이 기대된다.

Acknowledgements

본 연구는 행정안전부 극한재난대응기반기술개발사업의 연구비 지원(2019-MOIS31-010)으로 수행되었습니다.

Authors Information

Hansol Kang, Chungnam University, Master student

Hyunuk An, Chungnam University, Professor

Kwangya Lee, Korea Rural Corporation Agricultural Drought Mitigation Center, Director

References

Blum C. 2005. Ant colony optimization: Introduction and recent trends. Physics of Life Reviews 2:353-373. doi:10.1016/j.plrev.2005.10.001

Grubbs FE, Beck G. 1972. Extension of sample sizes and percentage points for significance tests of outlying obsevations. Technometrics 14:847-854.

Ju WJ, Kim JT, Oh ST. 2005. Measure and classification of agricultural water losses. Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers 2005:45-50. [in Korean]

Kang HS, An HU, Nam WH, Lee KY. 2019. Estimation of agricultural reservoir water storage based on empirical method. Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers 61:1-10. doi:10.5389/KSAE.2019.61.5.001. [in Korean]

Kim JT, Joo UJ, Park KW. 2006. Study on classification and analysis of agricultural water losses. Korea Water Resources Association May: 99-103. [in Korean]

Lee YJ, Kim SJ, Kim PS, Joo UJ, Yang YS. 2006. Study on the effective calculation method of irrigation water in a pady fields area. Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers 48:1-20. [in Korean]

MAF (Ministry of Agriculture and Forestry). 1997. A study on the water requirement variation with the farming conditions in the paddy field. MAF, Sejong, Korea.

Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers 50:885-900. doi:10.13031/2013.23153

Nam WH, Kim TG, Choi JY, Lee JJ. 2012. Vulnerability assessment of water supply in agricultural reservoir utilizing probability distribution and reliability analysis methods. Journal of the Korean Society of Civil Engineers 54:37-46. doi:10.5389/ksae.2012.54.2.037. [in Korean]

Shim JH, Kim PS, Kim SJ, Kwon HJ, Park HJ. 2012. Study on water management systems on agricultural water demand and supply by measuring. 2012 Academic Presentation of Water Resources Association May 16:628-632. [in Korean]